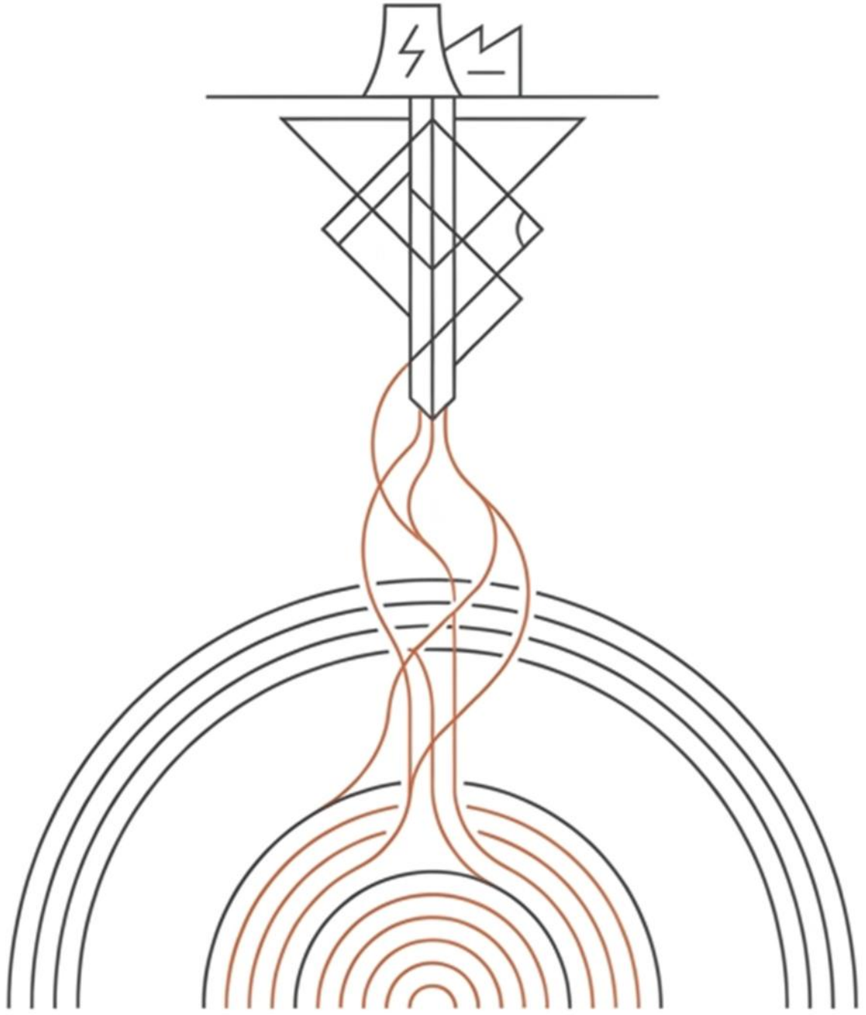
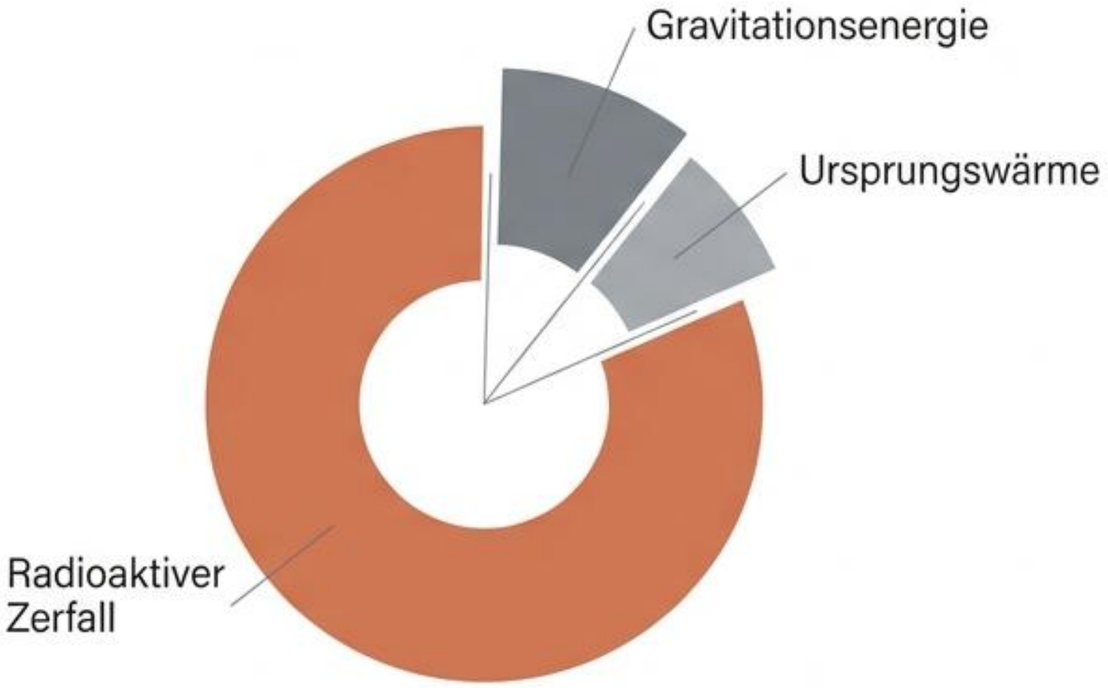


Geothermie: Vom Planetenkern zur Anlagendimensionierung

Systemintegration, Kraftwerksprozesse und oberflächennahe Anwendung

Gemini Notebook

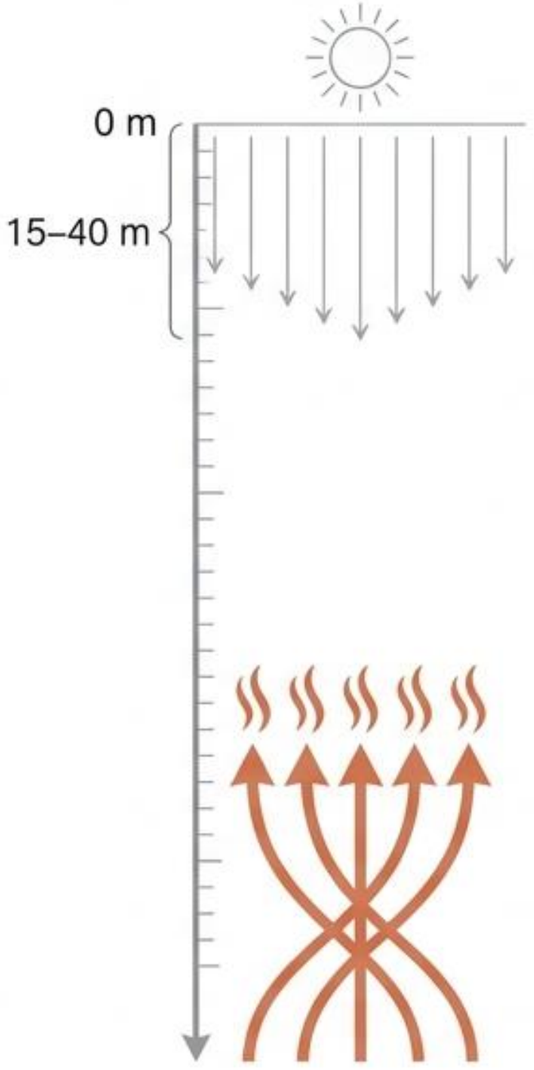
Ursprung der Erdwärme



Hauptquelle: Radioaktiver Zerfall von Isotopen (Uran, Thorium, Kalium).

Sekundärquellen: Gravitationsenergie und Ursprungswärme aus der Planetenentstehung.

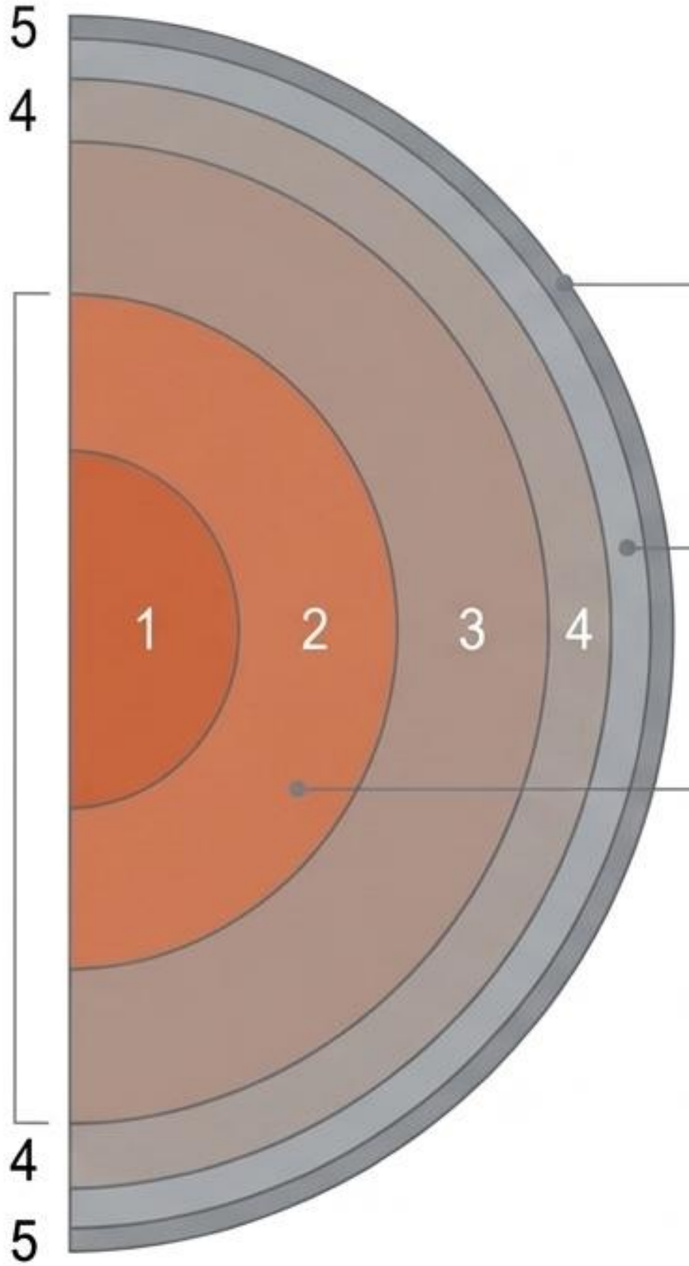
Thermodynamische Bilanzgrenze an der Oberfläche



Solarer Einfluss: Dominant in den oberen 15–40 m (ca. 20.000-fache Energiemenge der terrestrischen Wärmestromdichte an der Erdoberfläche).

Wärmetransport aus dem Inneren: Ausschließlich durch konduktiven oder konvektiven Transport an die Erdoberfläche.

Gemini Notebook



Erdkruste (Lithosphäre)

Dicke: 10–20 km.
Gradient: Stark abfallend, **ca. 30 K/km**.
Potenzial: Stark abhängig von Plattentektonik und Lage der Sedimentgesteine.

Erdmantel

Tiefe: Bis 3.000 km (fester Körper).
Gradient: Flacht extrem ab auf **ca. 1 K/km**.
(Notwendig, da sonst Sedimentschmelztemperaturen im Kern überschritten würden).
Temperatur: ca. 1.000 °C im oberen Bereich.

Erdkern

Aufbau: Äußerer Kern (flüssig) und innerer Kern.
Temperatur: Maximal 5.000 °C.

Gemini Notebook

Terrestrische Wärmestromdichte

65 mW/m²

- **Basiswert**: Mittlerer flächenspezifischer Wärmestrom an der Erdoberfläche.
- **Vulkanische Zonen**: 90 bis >200 mW/m².
- **Gesamter Erdstrom**: ca. 1.400 EJ.

Geologische Reservoire (Wärmeleitende Systeme)



Porenleiter | Kluftleiter | Karstwasserleiter

Systemeigenschaft: Im Gegensatz zu Solar- oder Windenergie unterliegt der geothermische Wärmestrom keinen messbaren tages- oder jahreszeitlichen Schwankungen – eine absolute Grundlastquelle.

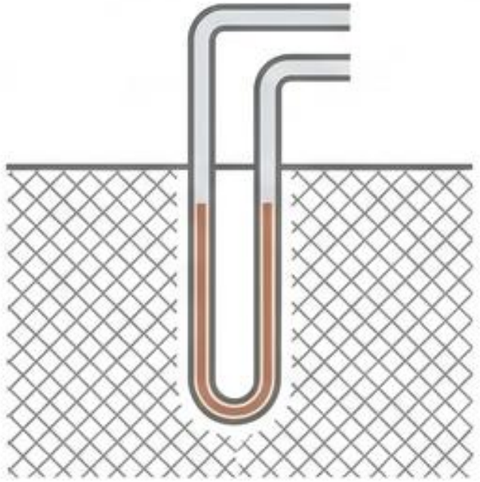
Gemini Notebook

Klassifizierung Geothermischer Systeme

	Oberflächennahe (Flache) Geothermie	**Tiefe Geothermie**
Tiefe	**Bis 400 m**	**> 400 m** (oft > 1.000 m)
Temperatur	**< 25 °C**	**> 130 °C bis 150 °C** (Verstromung) / **< 150 °C** (Wärmenetze)
Einflusszone	Solar dominiert (bis ca. 20 m), danach neutrale Zone (15–40 m), gefolgt von geothermischem Fluss.	Rein geothermischer Wärmetransport (teilweise Hochenthalpielagerstätten an tektonischen Zonen).
Anwendung	Gebäudebeheizung mittels gekoppelter Wärmepumpen.	Stromerzeugung, Heizzentralen für Nah- und Fernwärme.

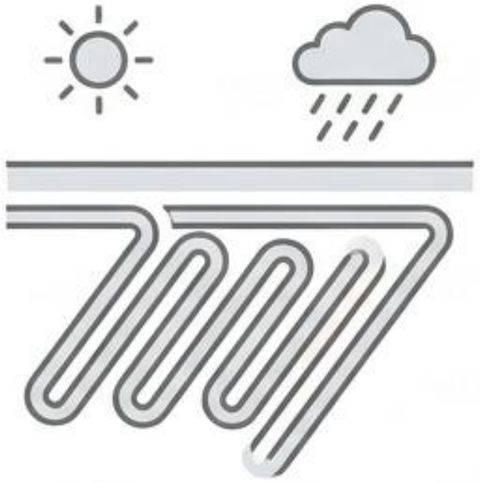
Gemini Notebook

Systemkomponenten im oberflächennahen Untergrund



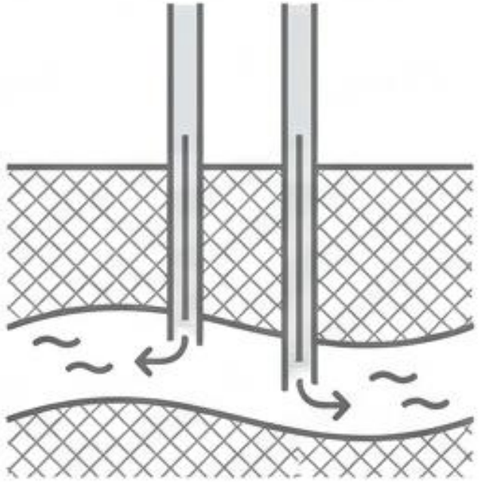
Erdwärmesonden

- Vertikale Bohrungen (typisch 50–150 m).
- Geschlossenes System (Wasser-Glykol-Gemisch als Trägermedium für Frostschutz).
- Leistung: ca. 50 W/m (bis max. 90 W/m).



Erdwärmekollektoren

- Horizontale Verlegung.
- Nutzt stark solare Einträge und Niederschlag als Wärmeträger.

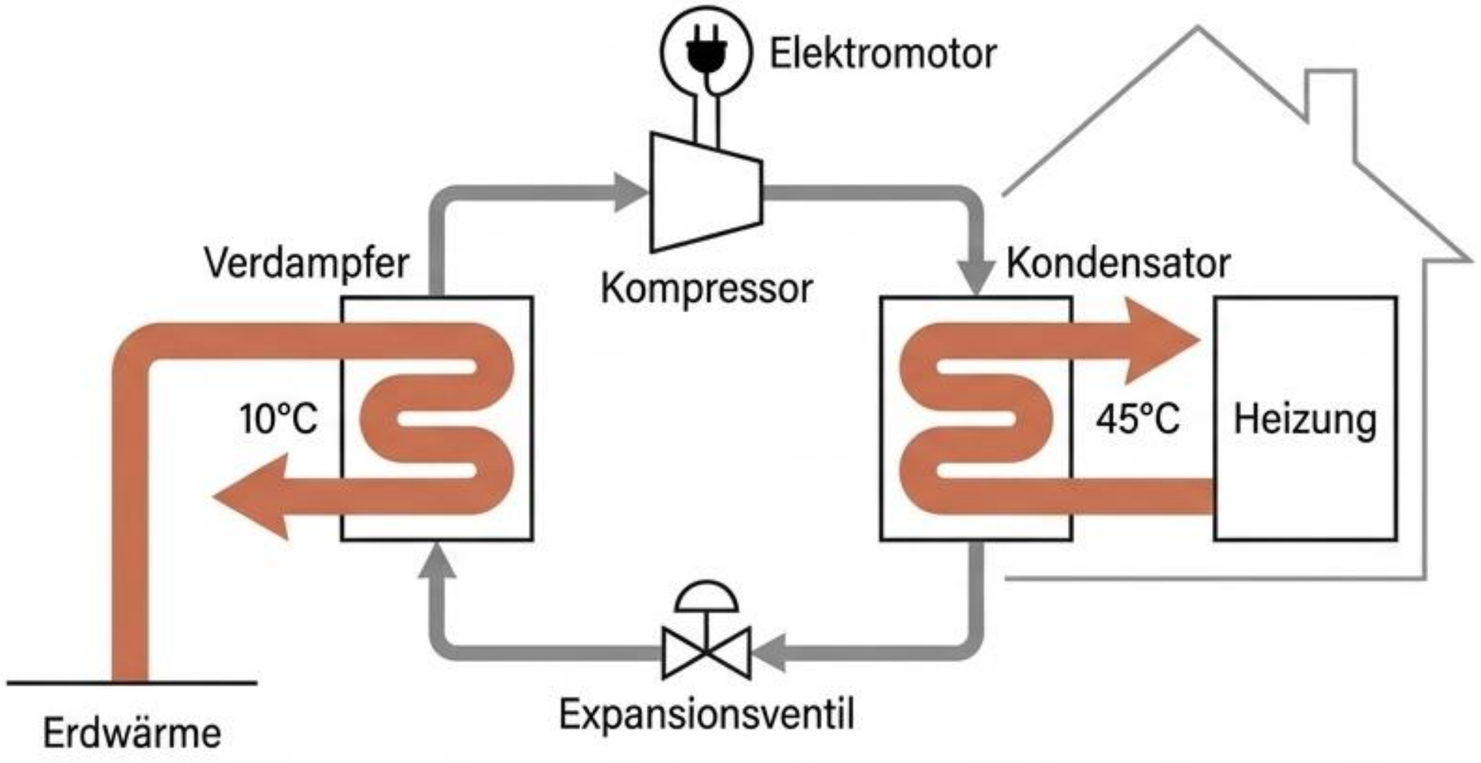


Brunnenanlagen

- Nutzung von Grundwasser/Sole als direkter Wärmeträger.
- Regulatorisch anspruchsvoller, aber hohe Übertragungseffizienz.

Gemini Notebook

Die Wärmepumpe: Thermodynamische Transformation



Zweck:
Anhebung des niedrigen Erdwärme-Temperaturniveaus auf nutzbare Gebäude-Vorlauftemperaturen durch Einsatz technischer (elektrischer) Arbeit.

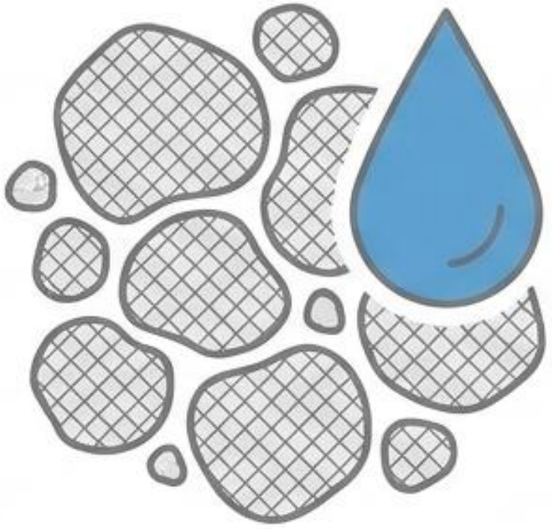
Leistungszahl (COP) & Effizienz:
Wirtschaftlicher Betrieb bei einer Temperaturdifferenz (Verdampfung zu Kondensation) von 5 K bis 10 K.
Je größer die Differenz zwischen Bodentemperatur und Heiztemperatur, desto geringer die Leistungszahl.

Systemgrenzen:
Unwirtschaftlich in unisolierten Altbauten (zu hohe Vorlauftemperatur).
Prädestiniert für Niedrigenergiehäuser (Flächenheizungen).

Gemini Notebook

Physikalische & Regulatorische Rahmenbedingungen

Bodenbeschaffenheit (Physik)



Feuchte, nasse Böden haben eine höhere spezifische Wärmekapazität und speichern Wärme besser als trockene Böden.

Richtlinien & Gesetze (Regulatorik)

VDI 4640 Teil 2
Maßgebliche Richtlinie für spezifische Entzugsleistungen verschiedener Untergründe (Standardnäherung: 50 W/m).

Bundesberggesetz (BBergG)
Bohrungen > 100 m erfordern zwingend ein bergrechtliches Genehmigungsverfahren.

Wasserhaushaltsgesetz (WHG)
Individuelle Prüfung der Grundwasserproblematik bei Bohrungen (Nähe zu Fließgewässern).

Gemini Notebook

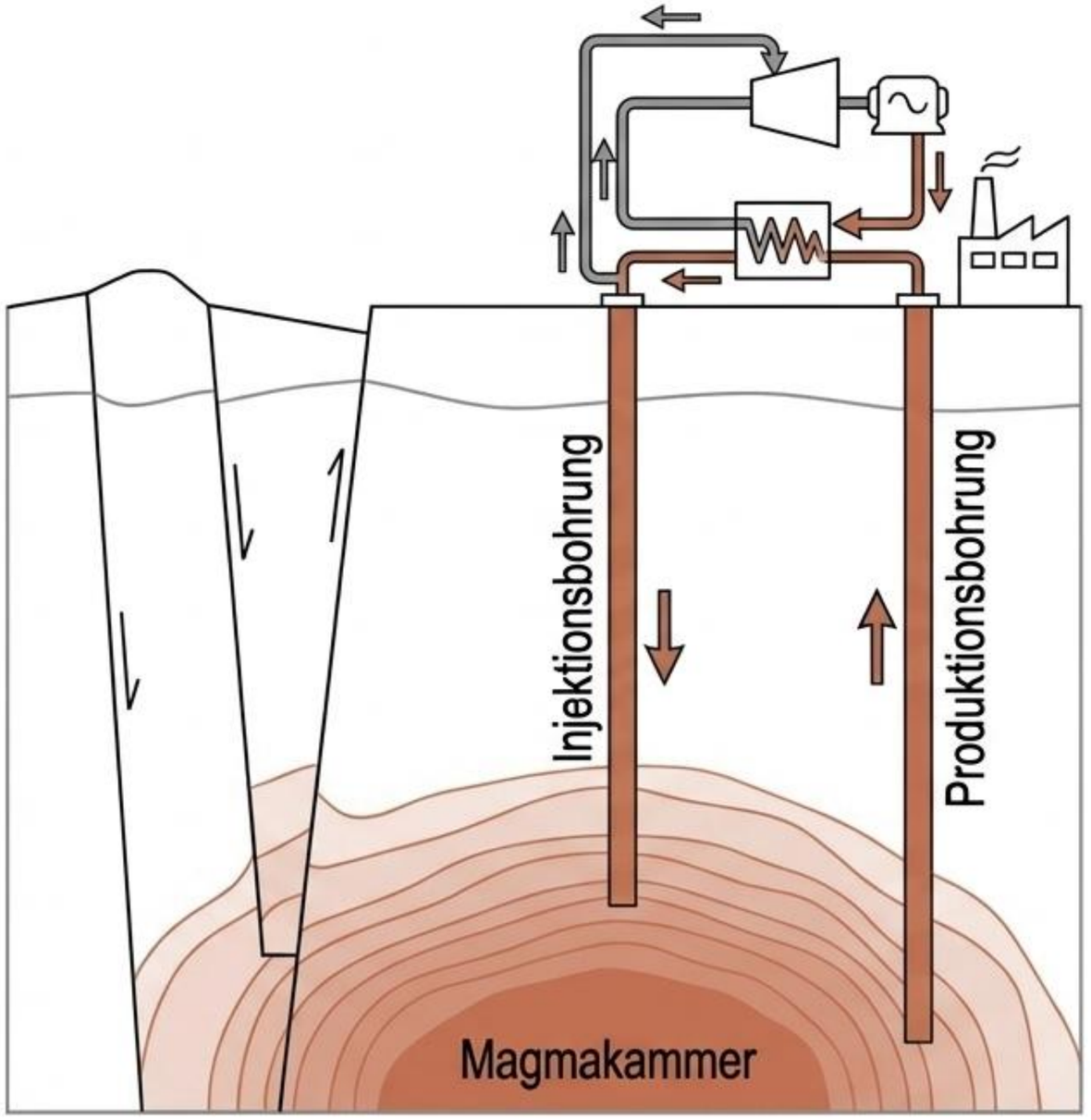
Tiefe Geothermie: Hochenthalpielagerstätten

Geologisches Setting

- Prädestiniert an tektonischen Plattengrenzen (z. B. Aufeinandertreffen von eurasischer und nordafrikanischer Platte).
- Hochenthalpiestätten: Temperaturniveaus von weit über 100 °C in relativ geringen Tiefen (< 2.000 m).

Betriebsprinzip

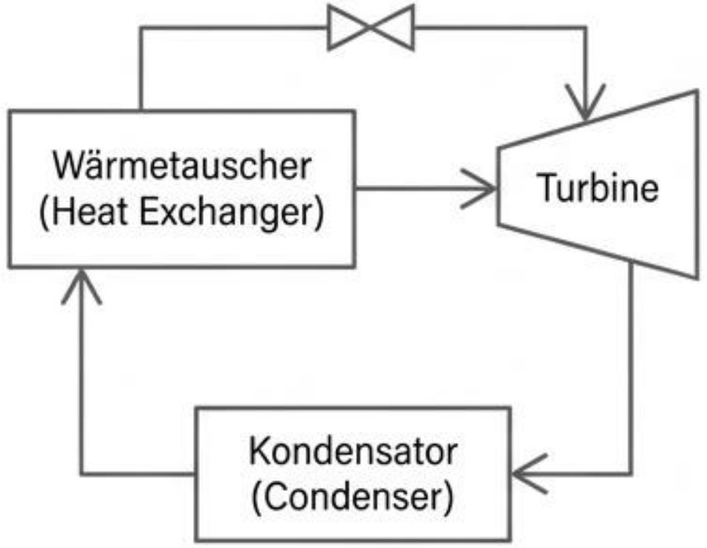
- Dampf- oder wasserdominierte Systeme.
- Injektion von Wärmeträgermedien zur Energieaufnahme.
- Reinjizierung des Mediums nach Aufbereitung zur Minimierung von Umweltauswirkungen und Emissionen.



Gemini Notebook

Kraftwerksprozesse zur Stromerzeugung

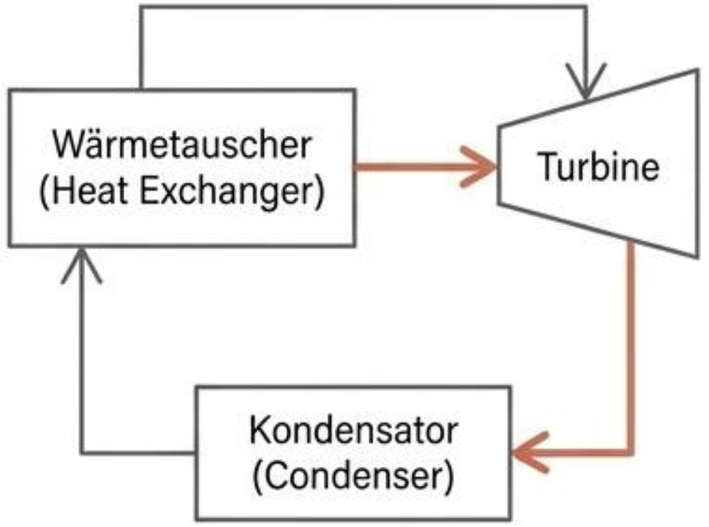
Entspannungsverdampfung (Flash)



Entspannungsverdampfung (Flash)

(Fast) siedende Flüssigkeiten werden unter Druck gefördert. Entspannung an einer Drosselstelle führt zur Teilverdampfung -> Antrieb einer Dampfturbine.

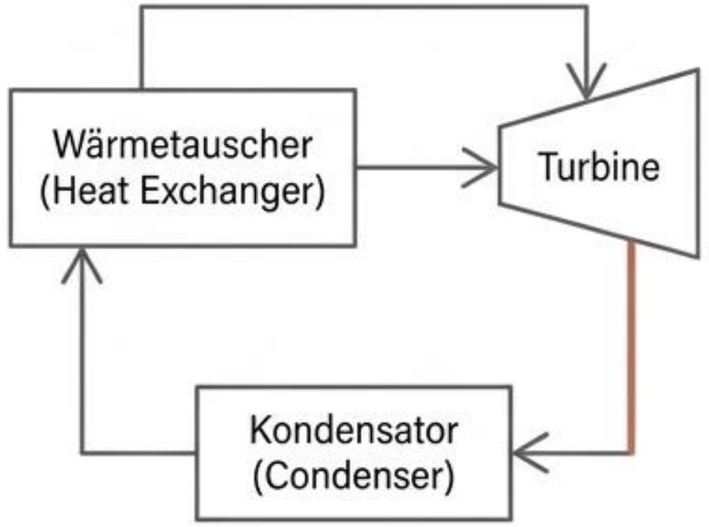
ORC-Prozess (Organic Rankine Cycle)



ORC-Prozess (Organic Rankine Cycle)

Hydrothermale Stromerzeugung bereits ab 80 °C. Einsatz von Thermoöl, das bei geringen Temperaturen verdampft.

Kalina-Prozess



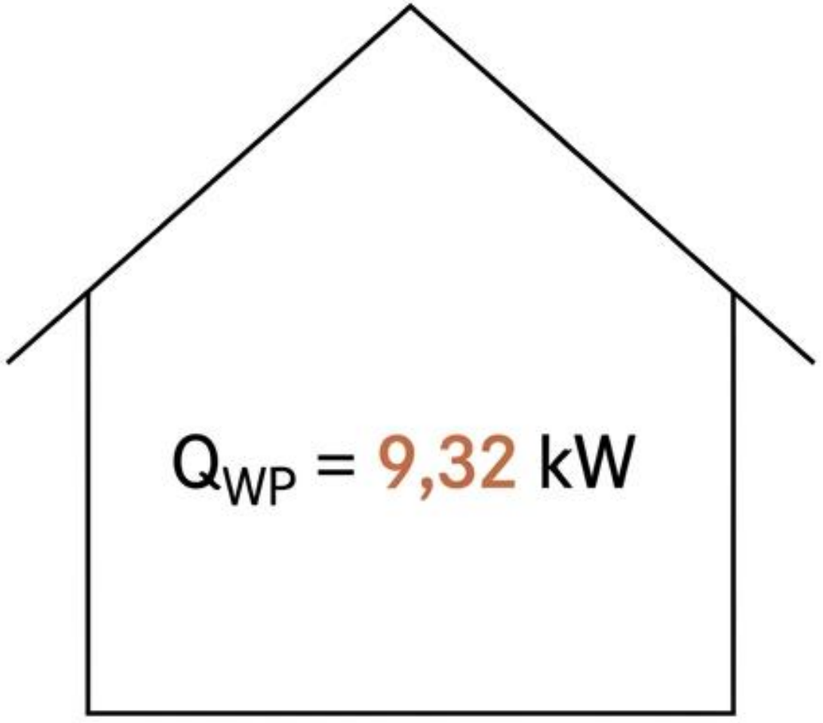
Kalina-Prozess

Einsatz von Zweistoffgemischen (z. B. Ammoniak und Wasser).
Höherer thermischer Wirkungsgrad, besonders bei niedrigen Vorlauftemperaturen < 140 °C.

Gemini Notebook

Praxisbeispiel: Dimensionierung einer Erdwärmesonde

Aufgabenstellung: Ermittlung von Anzahl und Tiefe der Sonden für die Heizenergieversorgung eines Einfamilienhauses.



Gegebene Systemparameter

Gesamtwärmeleistung (Q_{WP}) = 9,32 kW
(Verhältnis von Wärmeleistung zu aufzuwendender elektrischer Leistung)

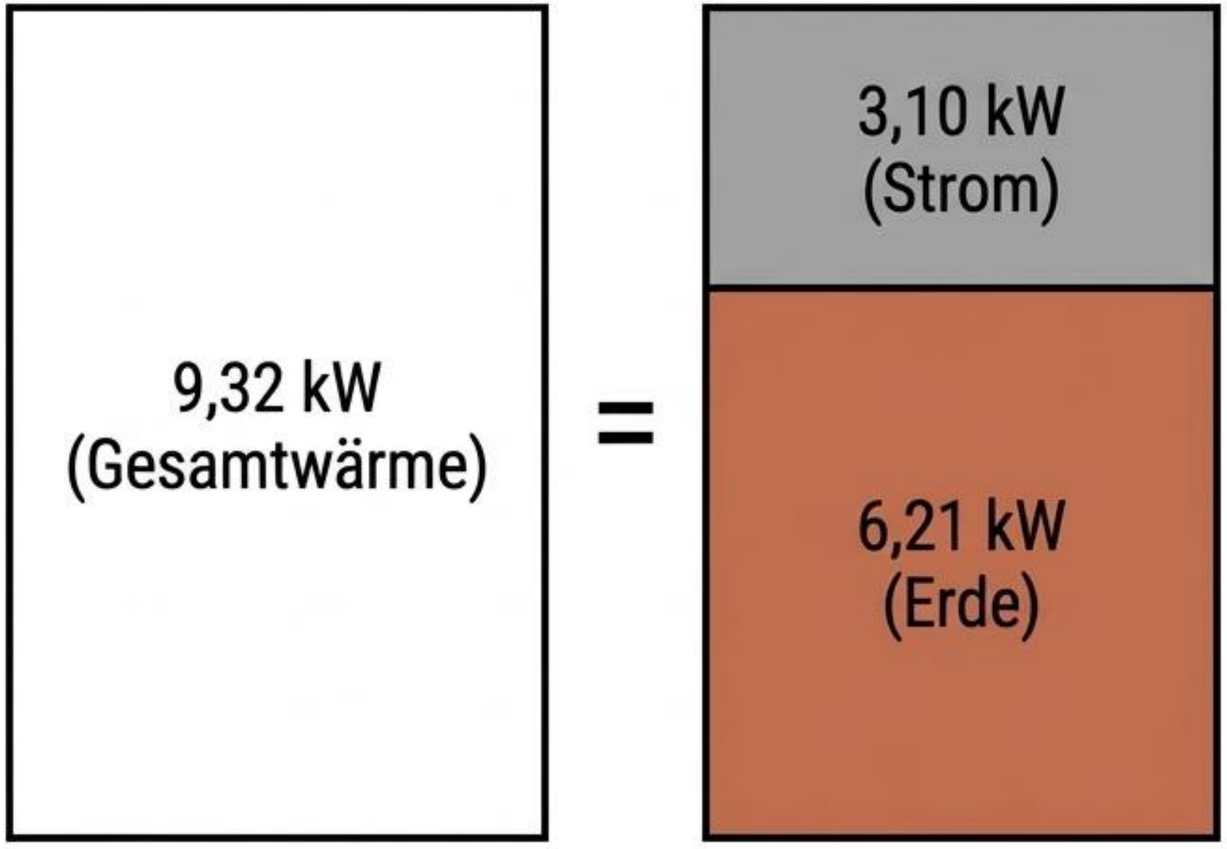
Leistungszahl (COP) = 3,0

Spezifische Entzugsleistung = 50 W/m
(Näherungswert nach VDI 4640)

Gemini Notebook

Schritt 1: Bestimmung der tatsächlichen Kälteleistung

Vorsicht: Die Referenzgröße für die Erdbohrung ist NICHT die Wärmeleistung, sondern die Kälteleistung (Energie aus dem Boden).



1. Elektrische Leistung (P_{el}):

$$P_{el} = \frac{Q_{WP}}{COP}$$

$$P_{el} = \frac{9{,}32\ kW}{3} = 3{,}10\ kW$$

2. Kälteleistung ($Q_{WP,kalt}$):

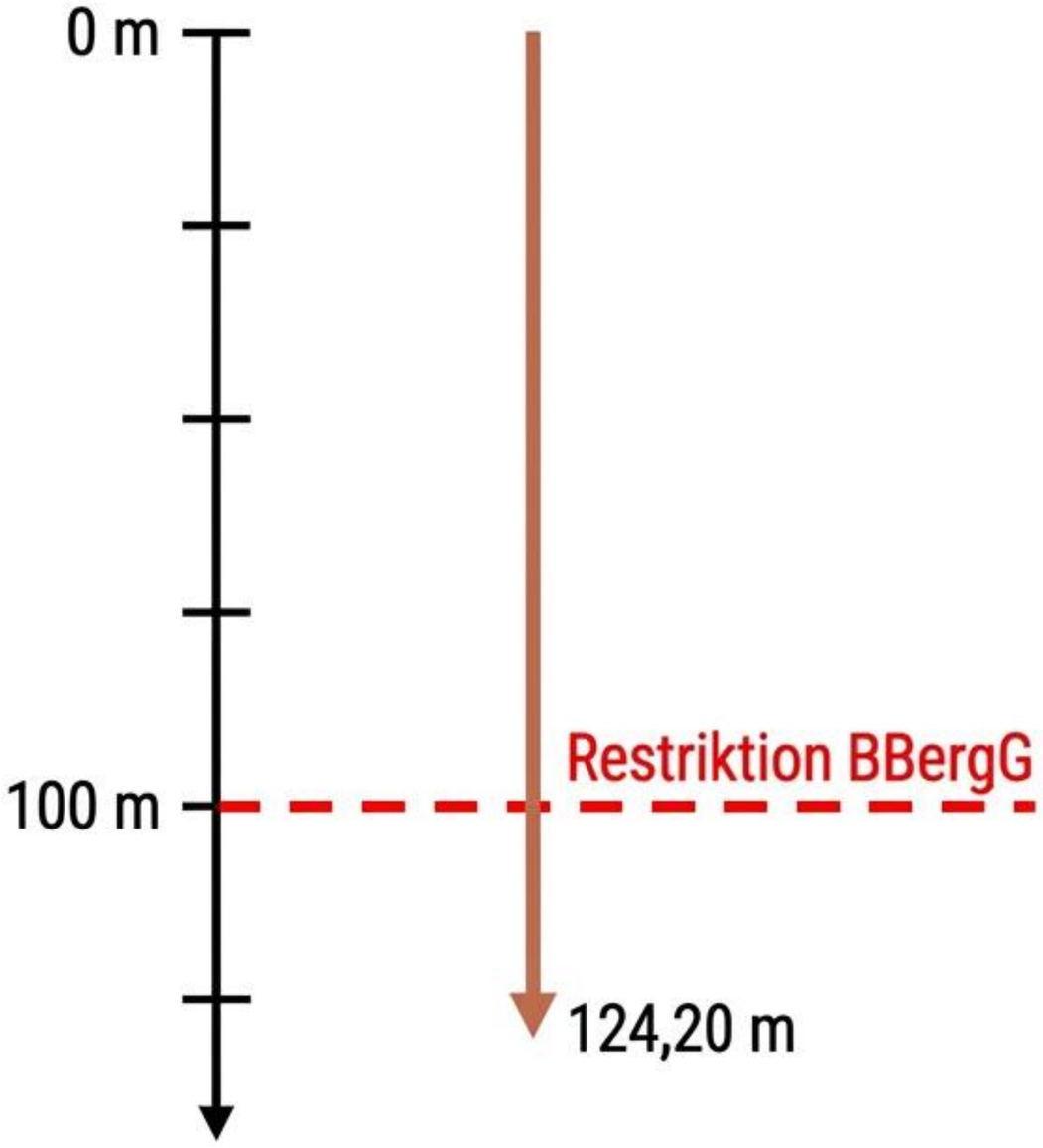
→ Die dem Erdreich zu entziehende Leistung

$$Q_{WP,kalt} = Q_{WP} - P_{el}$$

$$Q_{WP,kalt} = 9{,}32\ kW - 3{,}10\ kW = 6{,}21\ kW\ (6.210\ W)$$

Gemini Notebook

Schritt 2: Sondenlänge vs. Regulatorik



Theoretische Gesamtlänge (L_{Sonde}):

$$L_{Sonde} = \frac{Q_{WP,kalt}}{\text{Entzugsleistung}}$$

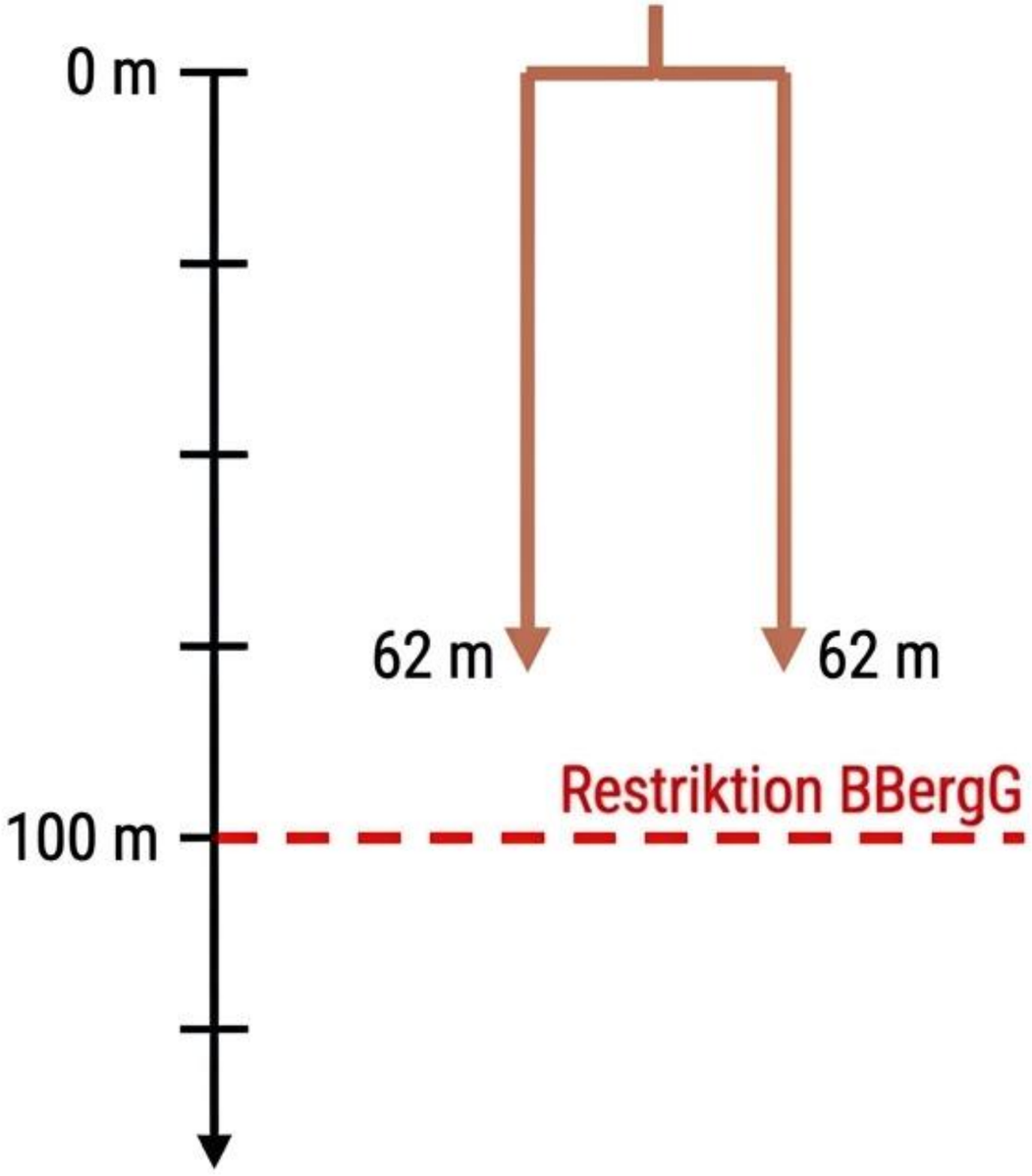
$$L_{Sonde} = \frac{6.210\ W}{50\ W/m} = 124{,}20\ m$$

Ingenieurstechnische & Rechtliche Kollision: Bohrungen > 100 m erfordern ein aufwendiges bergrechtliches Verfahren nach Bundesberggesetz (BBergG).

Physikalisches Problem: Eine Einzelsonde dieser Länge verursacht massive Druckverluste und erfordert unverhältnismäßig hohe Pumpenleistung.

Gemini Notebook

Schritt 3: Systemtechnische Lösung



Die Aufteilung:

Anstatt 1 x 124 m -> 2 x Erdwärmesonden à 62 m.

Vorteile der Symmetrie:

Rechtssicherheit: Keine Genehmigung nach BBergG erforderlich (< 100 m).

Hydraulik: Zwei gleich lange Sonden garantieren identische Druckverluste und optimale Durchströmungscharakteristika.

Effizienz: Deutlich reduzierte elektrische Antriebsenergie für die Solepumpen.

Gemini Notebook

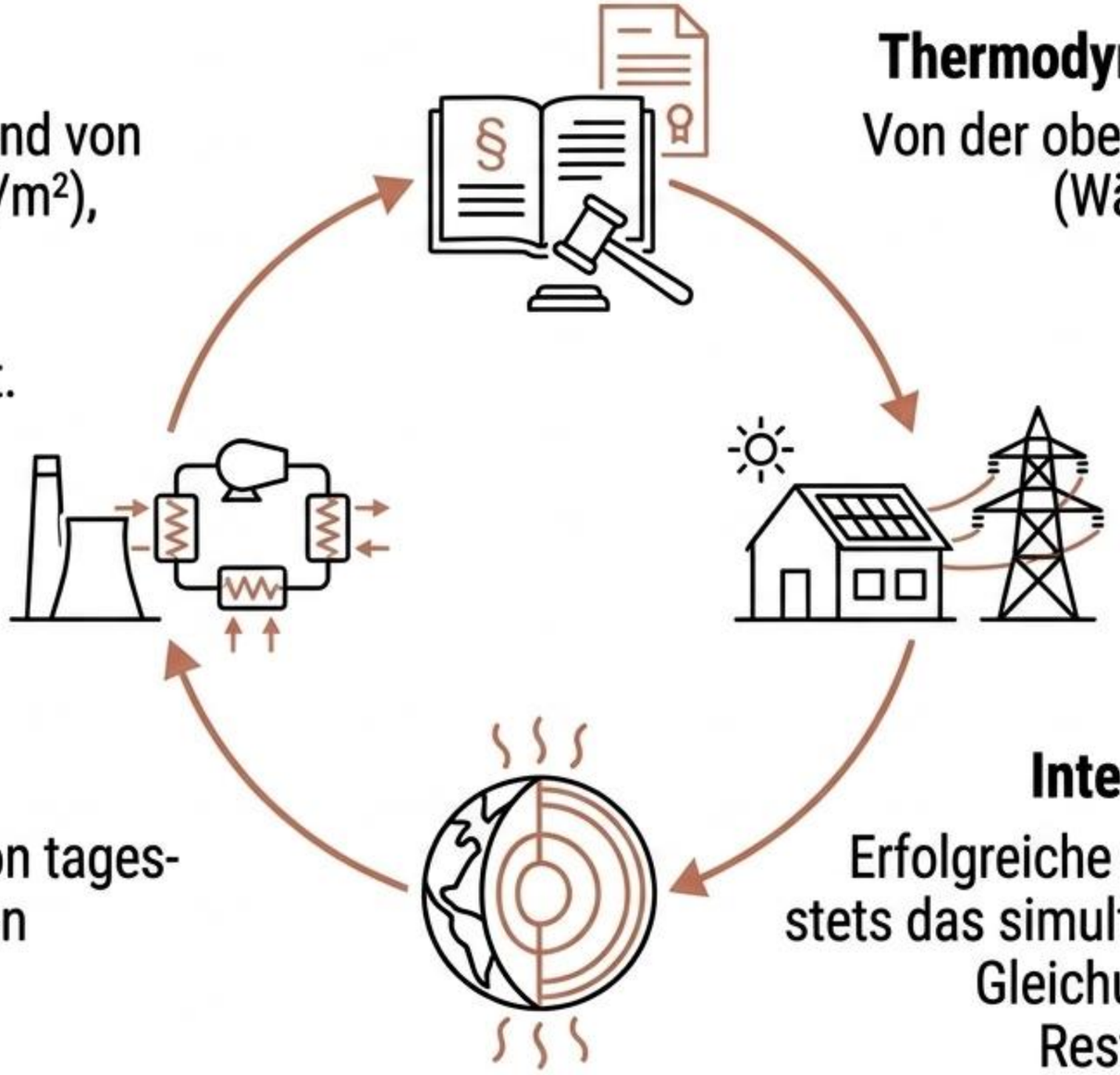
Fazit: Geothermie als integratives Energiesystem

Geologie als Fundament

Die Nutzbarkeit wird zwingend von Wärmestromdichte (65 mW/m²), Temperaturgradienten und Gesteinseigenschaften (Wärmeleitfähigkeit) diktiert.

Thermodynamische Skalierbarkeit

Von der oberflächennahen Heizwärme (Wärmepumpen/COP) bis zur tiefen Stromerzeugung (ORC/Kalina-Prozesse).



Regenerative Grundlast

Vollkommen unabhängig von tages- oder jahreszeitlichen solaren Schwankungen.

Interdisziplinäre Auslegung

Erfolgreiche Anlagenplanung erfordert stets das simultane Lösen physikalischer Gleichungen und regulatorischer Restriktionen (BBergG/WHG).

Gemini Notebook